

(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。 Int. Cl. G21C 3/00 (2006.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2006년10월23일 10-0637944 2006년10월17일
--	-------------------------------------	--

(21) 출원번호	10-2003-7014964	(65) 공개번호	10-2004-0002966
(22) 출원일자	2003년11월17일	(43) 공개일자	2004년01월07일
번역문 제출일자	2003년11월17일		
(86) 국제출원번호	PCT/EP2002/005057	(87) 국제공개번호	WO 2002/95765
국제출원일자	2002년05월08일	국제공개일자	2002년11월28일

(30) 우선권주장	10124637.4	2001년05월18일	독일(DE)
	10145289.6	2001년09월14일	독일(DE)

(73) 특허권자 프라마툼 아엔페 게엠베하
독일 에얼랑엔 프라이에스레벤슈트라쎄 1 (우:91058)

(72) 발명자 슈타벨, 위르겐
독일91053에어랑엔자이텔슈타익16

 렌, 밍민
독일91058에어랑엔슈타우텐백6

(74) 대리인 남상선

심사관 : 김용훈

(54) 가압경수로 노심을 조립하기 위한 방법 및 대응하는 재충전 노심

요약

가압경수로의 노심은, 노심 가장자리의 연료 엘리먼트가 휘어지는 경우 상기 휘어짐의 방향이 각각 바깥쪽을 향해 볼록하게 정렬되는 방식으로 조립된다. 원자로가 가동되면 상기 연료 엘리먼트들 사이의 작은 갭을 더 큰 갭을 사용하여 확장시키는 힘이 발생하여 상기 연료 엘리먼트의 휘어짐을 방해한다.

대표도

도 13

명세서

기술분야

본 발명은, 특히 소모된 연료 엘리먼트(fuel element)가 제거되는 작업 정지 상태 이후에 단지 부분적으로 연소되었으나 결함이 있는 연료 엘리먼트가 수리(repair)되고, 노심(core)의 리로딩(reloading)을 위해 새로운 연료 엘리먼트가 제공되며, 리로딩된 노심을 위한 계획에 따라 다시 가동되는 가압경수로의 노심을 조립하는 방법과 대응하는 리로딩된 노심에 관한 것이다.

배경기술

이러한 타입의 리로딩된 노심에 있어서, 노심의 가장자리(edge), 즉 가장 바깥쪽 줄(outermost row) - 경우에 따라서는 가장 바깥쪽의 두 개의 줄들 - 에 반응성이 낮은 연료 엘리먼트가 설치됨에 따라, 노심으로부터 확산되어 핵 연쇄반응과 열 발생을 유지하기 위해 소모되는 중성자의 비율이 낮게 유지된다(낮은 유출(Low Leakage) 로딩). 따라서, 최초에 사용된 연료 엘리먼트의 핵분열성(fissile) 물질이 부분적으로 소모되었기 때문에, 이레디에이트된(irradiated) 연료 엘리먼트들이 계속 재사용될 수 있다면, 특히 선행하는 작업 사이클들 중 하나에서 이미 이레디에이트된 연료 엘리먼트들은 노심의 가장자리에 있는 연료 엘리먼트 위치들에 위치하기에 적당하며, 이러한 연료 엘리먼트들은 결함이 없고 또한 이미 수리되지 않았다.

결함은, 예컨대, 연료봉의 피복 튜브 또는 스페이서에 난 구멍이나 유사한 손상에 의해 발생하며, 이 때 손상된 연료봉 또는 스페이서는, 수리되는 것이 경제적으로 합당하다면, 새로 교체된다. 그러나 그러한 수리 작업은 작업자의 보호를 위해 수중에서 원격으로 수행되어야 하기 때문에 비용이 많이 든다.

일반적으로 이레디에이트된 연료 엘리먼트는 휘어지기도 하는데, 이 때 다음 작업 사이클의 종료시 상기 휘어진 연료 엘리먼트가 노심으로부터 더 이상 제거될 수 없고(노심 어셈블리(assembly)에서 휘어진 연료 엘리먼트가 인접한 연료 엘리먼트들에 걸리기 때문임), 또는 제어봉이 연료 엘리먼트의 안내 튜브 내에서 더 이상 원활하게 이동할 수 없다고 우려되는 경우, 휘어진 연료 엘리먼트도 마찬가지로 결함이 있는 것으로 간주된다. 현재로서는 이처럼 휘어진 연료 엘리먼트를 다시 곧게 펼 수 있는 경제적인 수리 방법이 공지되어 있지 않다.

일부만 연소된, 더 이상 수리될 수 없는 연료 엘리먼트는 상당한 경제적 손실을 야기한다. 또한 개별 연료 엘리먼트들에 아직 결함이 없는 경우에도 휘어진 연료 엘리먼트를 포함한 노심 자체가 경제적 손실을 의미한다. 즉, 노심 연결시 인접한 연료 엘리먼트들 사이의 좁은 갭은 연료의 높은 출력 및 최적의 효율의 관점에서 선택된 것이고, 정확하게 유지되어야 한다. 연료 엘리먼트가 휘어진 경우에는 이러한 조건이 제한적으로만 충족될 수 있다.

연료봉 및 스페이서의 손상이 화학적인 원인(예: 부식) 또는 물리적인 원인(예: 다른 부품들과의 마찰 및/또는 이물질의 침투)에 의해 야기되는 경우, 개선된 재료, 이물질 필터의 설치, 디자인 변경 등의 조치를 통해 새로운 연료 엘리먼트들이 손상되는 것을 방지한다. 그 결과 경제적 손실이 점차 감소될 수 있다.

휘어짐(bending)의 원인에는 지금까지 정확하게 밝혀지지 않은 구체적이고 다양한 원인(예: 열팽창에서의 이방성(비등방성), 또는 방사(radiation)로 인한 피복 튜브 및/또는 제어봉 안내 튜브의 길이 팽창 또는 선호되는 냉각수 흐름의 방향)이 있을 수 있으며, 이 때 (연료봉이 고정되는 "연료 엘리먼트-프레임"을 위한) 스페이서 및 안내 튜브의 상호 고정 및 연료봉의 지지를 포함하여 상기 스페이서 및 안내 튜브를 위한 몇몇 재료와 디자인은 연료 엘리먼트의 휘어짐에 의한 영향을 덜 받는다.

노심이 리로딩되면, 상기와 같이 휘어짐이 적은 프레임을 가진 새 연료 엘리먼트를 사용함으로써 이미 휘어진 재사용된 연료 엘리먼트가 더 세게 휘어져 예상보다 빨리 교체되어야 하는 상황이 발생하지 않도록 하며, 많은 리로딩 작업 이후 점점 더 많은 수의 연료 엘리먼트가 그러한 휘어짐이 적은 프레임을 갖게 되면 휘어진 노심을 다시 똑바로 펼 수 있는 방안이 요구된다. 그러나 지금까지는 최적의 설계와 실제 갭 폭의 편차에 의해 발생하는 경제적 단점을 예방하는 것이 불가능하였고, 심지어 도 3에서 분명하게 알 수 있는 것처럼, 이러한 단점들은 처음부터 발생한다.

JP 04-204 084 A에는 최종 작업 사이클에서 발생한, 노심의 특정 장소에 놓인 연료 엘리먼트-케이스의 휘어짐을 변형 벡터로 기록하고, 이레디에이트된 연료 엘리먼트의 변형 벡터가 다음 사이클에서 실제로 동일한 크기의 휘어짐에 의해 반대 방향으로 보상되는 방식으로 상기 케이스를 조정함으로써 상기 연료 엘리먼트가 다음 사이클에서 다시 사용될 수 있도록 하는 것이 제안되어 있다. 그러나 이 경우에도 노심 내에서 휘어지지 않은 (새로운) 연료 엘리먼트들과 상이하게 휘어진 연료 엘리먼트들이 서로 이웃하여 배치되기 때문에 최적의 노심 구성에 비해 간격 비율이 깨진다.

발명의 상세한 설명

본 발명의 목적은 가압경수로의 연료 엘리먼트의 휘어짐에서 기인하는 경제적 단점을 광범위하게 방지하는 것이다.

상기 목적을 달성하기 위해 본 발명은 노심이 조립되는 방식에 대하여 다루게 된다. 이미 전술한 바와 같이, 그러한 방식의 조립시 예정된 로딩 계획(loading plan)에 따라 이레디에이트되었고 재사용될 수 있는 연료 엘리먼트들은 자신들이 배치될 수 있는 연료 엘리먼트 위치들로 삽입된다. 본 발명에 따라, 휘어지고 노심의 가장자리에 삽입된 재사용 가능한 연료 엘리먼트들은 최대로 휘어진 부분이 노심의 외부면(outer side)을 향하도록 배향된다(oriented).

즉, 노심 가장자리의 연료 엘리먼트 위치에 이레디에이트되어 휘어진 연료 엘리먼트들이 삽입되는 이러한 타입의 노심에서는 본 발명에 따라, 상기 연료 엘리먼트의 휘어짐 정도가 노심의 외부면에서 최대가 되도록 노심의 가장자리에 있는 연료 엘리먼트들의 방향이 조정된다. 그럼으로써 리로딩 작업 이전에 비교적 강하게 휘어진 연료 엘리먼트들을 가지는 노심이 단시간에 미리, 실질적으로는 하나의 주기 내에, 실제로 다시 곧게 펴질 수 있다. 그 결과, 이미 여러 주기에 걸쳐서 이레디에이트된, 강하게 휘어진 연료 엘리먼트들이 곧게 펴지는 정도(extent)는, 상기 연료 엘리먼트들이 새로운 연료 엘리먼트들 또는 거의 휘어지지 않은 연료 엘리먼트들을 휘도록 하기 위해 가할 수 있는 힘의 감소를 반영한다. 또한 연료 엘리먼트들 사이에서 평균값 이상의 폭을 가진 갭은 축소되고, 평균값 이하의 값을 가진 갭은 확대된다. 따라서, 갭 폭이 예정된 최적값에 가까워진다.

본 발명은 공지되어 있는 가압경수로의 구조에 있어서, 중심부로부터 가장자리로 가면서 연속적으로 감소되는 방사상으로 지향되는 힘이 이러한 플로우(flow)에 의해 연료 엘리먼트들로 가해진다는 사실에서 출발한다. 또한, 이레디에이트된 노심에 대한 관찰 및 측정을 통해 연료 엘리먼트들과 냉각수 사이의 상호 작용을 추론할 수 있으며, 상기 상호 작용을 통해 노심 어셈블리에서 더 작은 갭들이 더 큰 갭들로 확장된다. 또한, 노심의 중심에서는 연료 엘리먼트들이 소성 변형에 의해서만 변형된다는(plastically deformed) 관점에서 실제로 "결빙(frozen)"되는 것처럼 보인다. 전술한 "낮은 유출" 로딩의 경우에서와 같이, 노심의 가장자리에 연소 잔여물을 적게 포함하는(또는 적어도 노심의 모든 연료 엘리먼트의 대응하는 질량의 평균값보다 적은 양의 핵분열성 물질을 포함하는) 연료 엘리먼트가 배치되면 원자료가 가동되는 동안 가장자리의 플럭스 밀도(flux density)가 낮은 고속 중성자의 플럭스 분포가 발생하기 때문에, 그 결과 가장자리에 있는 연료 엘리먼트들은 탄성적이고 크리프(creep) 현상이 훨씬 덜 나타난다.

따라서, 줄지어 위치한 연료 엘리먼트들에 의해 노심의 가장자리에서 생기는 힘이 노심 내부로 작용한다. 외부(바깥쪽) 연료 엘리먼트가 바깥쪽으로 휘어져 있으면, 전술한 바람직한 작용에 의해 평형 상태가 이루어진다. 그러므로 본 발명에 따르면, 새로운 작업 사이클의 시작부터 의도적으로 이미 적당히 휘어지고 이레디에이트된 연료 엘리먼트들이 노심의 가장자리에 삽입된다.

여기서 연료 엘리먼트의 수직 중심축이 대략 C자형으로 휘어진 경우(이는 이레디에이트된 연료 엘리먼트의 일반적인 형태임), 연료 엘리먼트가 "휘어진" 것으로 간주된다. 따라서, "휘어진 정도의 최대치"는 동일 위치에 사용된 휘어지지 않은 연료 엘리먼트의 중심축으로부터 상기 C자형 중심축의 정점까지의 거리를 말하며, "평균 휘어짐"은 C자형 중심선 상에 있는 모든 점들의 거리의 평균을 말한다. 이러한 정의는 C자형 휘어짐이 어느 방향으로든 훨씬 적게 휘어진 정도를 가지고 상부 끝 및/또는 하부 끝에 인접하는 다른 형태의 휘어짐에도 적용될 수 있다.

노심의 가장자리에서 사용된 연료 엘리먼트가 다른 위치에서 노심 내에 삽입된 연료 엘리먼트와 인접하는 면을 가지고, 상기 면으로부터 직경 반대편에 놓인 연료 엘리먼트의 면이 노심의 연료 엘리먼트 위치에 삽입된 연료 엘리먼트에 인접하지 않는 경우, 연료 엘리먼트 위치는 "노심의 가장자리"에 놓인다.

본 발명은 노심 가장자리에 놓인 몇몇 연료 엘리먼트들이 휘어지지 않거나 적어도 명백하게 최대로 휘어진 부분을 갖지 않을 수 있는 가능성을 배제하지 않는다. 그러나 어떠한 경우에도 본 발명은 휘어진 연료 엘리먼트 그룹을 제공하며, 이 때 최대 휘어진 정도가 특정 제한값을 초과하는 가장자리의 모든 연료 엘리먼트들이 상기 그룹을 형성하고 지시된 방식으로 배향된다.

가장자리에 제공된 연료 엘리먼트들의 휘어짐 정도가 매우 상이한 경우, 바람직하게는 거의 같은 정도로 휘어진 연료 엘리먼트들이 가장자리에 걸쳐서 최대한 균등하게 분포된다. 그러나 가장자리에 존재하는 개별 위치들이 실질적으로는 휘어지지 않은 연료 엘리먼트들에 의해 점유되는 것도 문제가 되지는 않는다.

바람직하게는 가장자리 위치에 인접하는 연료 엘리먼트 위치에도 같은 방향을 향해 휘어진 연료 엘리먼트들이 삽입된다.

중요한 것은, 연료 엘리먼트들이 명백하게 최대로 휘어진 부분을 갖는 경우, 가장자리에 삽입되는 연료 엘리먼트들은 자신들의 최대로 휘어진 부분이 노심 내부를 향하지 않도록 삽입되어야 한다. 즉, 상기 연료 엘리먼트의 수직 중심선에 대하여 최대로 휘어진 부분이 상기 연료 엘리먼트의 4개의 측면 중 하나를 향하는 것이 아니라 연료 엘리먼트의 정사각형 횡단면의 2개 측면 사이의 모서리(corner)를 향하는 방식으로 연료 엘리먼트가 휘어져야 하는 경우, 상기 2개 측면 중 적어도 하나의 측면이 노심의 외부면이 되도록(즉, 추가의 연료 엘리먼트가 인접하지 않음) 하여야 한다. 이러한 방식으로 배치된 연료 엘리먼트는 또한 최대로 휘어진 부분이 노심의 외부면을 향하는 연료 엘리먼트로서 설명된다.

본 발명의 기술한 실시예 및 추가의 바람직한 실시예들은 도면에 제시되어 있다.

도면의 간단한 설명

도 1은 가압경수로의 노심 횡단면을 나타낸 도면이다.

도 2는 이레디에이트된 노심 내에 연속하여 놓여 있는 3개의 연료 엘리먼트를 나타낸 도면이다.

도 3은 도 2의 상태에서 이레디에이트된 가운데 연료 엘리먼트를 휘어지지 않은 새 연료 엘리먼트로 교체한 후의 모습을 나타낸 도면이다.

도 4는 노심을 가로질러 순환하는 일렬로 된 14 개의 연료 엘리먼트들의 예를 나타낸 도면이다.

도 5는 평형 상태에서 도 4에 도시된 연료 엘리먼트들의 최대로 휘어진 부분이 새로운 노심에 관련된 제 1 휘어짐 초기값 세트로부터 상기 연료 엘리먼트들의 위치 함수로서 산출되는 것을 나타낸 그래프이다.

도 6은 도 5에서 산출된 평형 상태에서 유래하는 연료 엘리먼트들 간의 간격 폭을 상기 연료 엘리먼트들의 위치 함수로서 나타낸 그래프이다.

도 7 및 도 8은 도 5 및 도 6에 상응하는, 제 2 초기값 세트로부터 산출된 평형 상태의 함수를 나타낸 그래프이다.

도 9 및 도 10은 도 5 및 도 6에 상응하는, 제 3 초기값 세트로부터 산출된 평형 상태를 나타낸 그래프로서, 이 그래프에서는 제 3 초기값 세트가 본 발명에 따른 방법 및 노심의 작용을 증명하고 있다.

도 11 및 도 12는 도 7 및 도 8에 상응하는, 연료 엘리먼트와 물 사이의 상호 작용의 고려 없이 평형 상태를 산출하는 경우의 함수를 나타낸 그래프이다.

도 13은 본 발명에 따른 방법의 개요를 나타낸 도면이다.

실시예

도 1에 예로서 도시된 노심은 연료 엘리먼트 위치들을 포함하는, 15개의 행(R1 내지 R15) 및 상기 행들에 수직을 이루는 15개의 열(S1 내지 S15)을 포함하고 있다. 로딩 계획에 따라 노심의 가장자리에 있는 위치(RP)(또는 중심에 있는 위치(RC))에서 약 $1 \cdot 10^{13}$ (또는 $3 \cdot 10^{14}$)/(sec · cm²)의 빠른 중성자 플럭스(neutron flux)가 발생한다. 이를 위해 위치(RP) 및 그곳에 인접한 위치(RP')가 비교적 적은 잔여 연소물을 가진 이레디에이트된 연료 엘리먼트들로 채워지는 반면, 적어도 더 많은 다른 위치들, 특히 위치 "RC"는 새로운 고효율 연료 엘리먼트들로 채워진다. 전체 노심은 (도시되지 않은) 원자로 압력 탱크 내부의 노심 외벽(KU)에 의해 둘러싸여 있다.

로딩 계획은 작동 온도에서의 조건을 최적화하는 것을 목표로 하며, 연료 엘리먼트들이 바닥 피팅(bottom fitting)에 의해 하부 노심의 지지 격자 상에 서로 표준 간격을 두고 직립 고정됨으로써 일정한 표준 폭(g)(g = 1mm)의 갭이 발생하는 것을 기초로 한다. 도 2에는 나란히 배치된 3 개의 이레디에이트된, 그에 따라 휘어진 연료 엘리먼트(BA1, BA2, BA3)가 도시되어 있는데, 이 연료 엘리먼트들의 경우 일단 같은 방향으로 휘어지긴 했으나 중간 부분의 휘어짐 정도가 서로 상이하기 때문에 갭의 종단면이 오목-볼록 렌즈와 유사하다.

연료 엘리먼트의 길이는 약 4 m에 달하며, 그에 따라 4 mm의 최대로 휘어진 부분은 높은 기계적 강도를 요구한다. 그러한 휘어짐 및 더 많이 휘어짐을 가진 부분이 종종 관찰된다. 즉, 사이클 초기에 한쪽으로 4 mm 만큼 휘어진 연료 엘리먼트는 단일 사이클 내에서 다른 쪽으로 6 mm 만큼 휘어질 수 있다.

갭 폭의 평균값은 상기 갭의 오목-볼록 형태의 종단면으로 인해 표준 폭(g)의 차가 훨씬 덜하다. 그러나 도 3에 도시된 것처럼, 가운데 연료 엘리먼트가 새로운 또는 실제로 곧은 연료 엘리먼트로 대체되는 경우에는 상기 특성이 변한다. 곧게 뻗은 연료 엘리먼트의 양 쪽 갭의 매우 상이한 폭 때문에 비등방성(anisotropy)이 나타나며, 그 결과 제공된 출력이 현저하게 초과될 수 있다.

도 4에서는 모델 계산을 위해 노심 외벽들(K 및 K') 사이에 뻗어 있는 일렬의 연료 엘리먼트들(Q₁ 내지 Q₁₄)이 고려된다. 상기 연료 엘리먼트들의 위치는 연료 엘리먼트 바닥 피팅의 표준 위치를 통해 알 수 있고, 상기 위치에서는 모든 간격이 "g"와 같다고 가정된다. 모델은 상기 연료 엘리먼트의 대략 절반 높이에서의 단면을 고려하며, 연료 엘리먼트 "Q_n"(n = 1, ..., 14)은 휘어짐 정도(X_n)를 가진다. 통계적 평형을 위해 아래와 같이 가정된다:

연료 엘리먼트 Q₁:

$$F_1 + F_{k,1} + \alpha(g - X_2 - X_1 - g - X_1) - C^*(X_1 - X_{1,0}) = 0$$

연료 엘리먼트 Q_n:

$$F_n + F_{k,n} + \alpha(g - X_{n+1} - X_n - g - X_n + X_{n-1}) = 0$$

연료 엘리먼트 Q₁₄:

$$F_{14} + F_{k,14} + \alpha(g - X_{14} - g - X_{14} + X_{13}) - C^*(X_{14} - X_{14,0}) = 0$$

냉각수가 연료 엘리먼트에 가하는 전체 외력은 노심 내에서 방사적으로(radially) 외부로 작용하며, 경험적으로 노심 중심에서 약 30N에 달하고 가장자리(Q₁ 및 Q₁₄)에서는 소멸된다. 어디에든 연료 엘리먼트가 접촉하게 되면 접촉력(F_{k,n})이 발생한다. 지금까지는 연료 엘리먼트들간의 그러한 접촉이 관찰되는 일이 드물었는데, 그 이유는 연료 엘리먼트들간의 갭이 평균 갭 폭보다 작으면 상기 갭이 확장되고, 평균 갭 폭보다 크면(모델의 구조에서는 평균 갭 폭이 표준 폭(g)과 반드시 일치함) 상기 갭이 축소되는 방식으로 상기 연료 엘리먼트들과 냉각수 사이의 상호 작용이 명백하게 일어나기 때문이다. 이러한 상호 작용은 다른 방법으로는 설명할 수 없는 많은 결과(finding)들을 설명할 수 있다. 모델에서는 상기 힘이 연료 엘리먼트의 양쪽 갭 폭의 차에 비례한다고 가정된다. 대응하는 상호 작용 매개변수(α)는 - 실험과 경험에 따라- 인접한 1/9 mm의 갭의 경우 400N의 힘을 발생시키는 50 N/mm의 값으로 정해진다.

또한, 경험 및 측정을 통해, 노심 중심의 고속 중성자 플럭스 영역 내에 있는 연료 엘리먼트들은 더 이상 탄성을 갖지 않으며(연료 엘리먼트가 "결빙됨"), 상대적으로 높은 중성자 밀도로 인해 발생하며, 외력과 평형을 이루는 소성 변형(plastic deformation)만을 나타낸다는 결론이 내려질 수 있다. 저속 플럭스 밀도 영역(가장자리)에서는 이미 작업 사이클의 시작시 이레디에이트된 연료 엘리먼트들의 일부였던 연료 엘리먼트(Q₁ 및 Q₁₄)의 대응하는 소성 휘어짐(X_{1,0} 및 X_{14,0})이 크게 변하지는 않지만, 예컨대 강성(rigidity)을 나타내는 매개변수(C)(C = 250 N/mm)에 의한 탄성이 고려될 필요가 있다.

그러나, 전체적으로 노심의 평형 상태는 전체 외력들(F_n) 및 사이클 시작시 외부 연료 엘리먼트들에 이미 존재하였던 소성 휘어짐(X_{1,0}, X_{14,0})에 의해서만 좌우된다.

휘어지지 않은(새로운) 연료 엘리먼트들이 가장자리에 삽입되면, X_{1,0} = 0, X_{14,0} = 0으로 세팅된다. 계산 결과는 사이클 종료시 연료 엘리먼트(Q₁ 내지 Q₁₄)의 휘어짐(X_n)을 나타내는 도 5에서 볼 수 있다. 엘리먼트들은 모두 휘어져 있으며, 가장자리에 있는 엘리먼트들(Q₁ 및 Q₁₄)이 가장 덜 휘어져 있다. 양쪽의 휘어짐 정도는 노심 중심으로부터 시작하여 크기는 같으나 반대 부호(방향)를 가지며, 방사적으로 외부를 향하고 있다.

도 6에서 볼 수 있듯이, 갭 "GP_{0/1}"(벽(K)과 엘리먼트(Q₁) 사이) 및 갭 "GP_{14/0}"(Q₁₄와 K' 사이)이 실질적으로 표준 폭(g)과 같고, 가운데 갭 "GP₇"(연료 엘리먼트 Q₇과 Q₈ 사이)에서는 평균 갭 폭(G)이 최대값 G_{max} = 약 2.5 · G(2.5 mm에 근소함)를 취한다.

X_{1.0} = 4 mm, X_{14.0} = 0 mm는 연료 엘리먼트(Q₁)(노심 가장자리의 한쪽 면에 있는 다수의 또는 모든 연료 엘리먼트들을 나타냄)가 사이클 시작시 상기 연료 엘리먼트의 과거 이력(prior history)에 따라 노심의 다른쪽 가장자리를 향해 4 mm 휘어졌다는 것을 뜻한다. 노심 가장자리의 다른쪽 면에 있는 해당 연료 엘리먼트(Q₁₄)는 곧은(휘어지지 않은) 것으로 가정된다. 계산 결과는 도 7 및 도 8에 나와 있다. 모든 휘어짐은 동일 부호를 가지고 있다. 즉, (도 5의 방사상 대칭 분포와 달리) 모두 같은 방향으로 휘어져 있다. 이러한 특성은 실제와 일치하며, 사이클의 종료시 많은 노심에서 관찰되었다. 이미 처음에 휘어진 가장자리 연료 엘리먼트(Q₁₄)는 최대 휘어짐을 보여주고 있다. 즉, 이와 같은 노심 가장자리에서 최대 갭 폭(G_{max})이 나타난다. 상기 최대 갭 폭(G_{max})은 4.2 mm이다.

그러나 휘어진 가장자리 연료 엘리먼트(Q₁)가 자신의 휘어진 방향과 반대 방향으로(즉, 사전에 상기 연료 엘리먼트의 종축을 중심으로 180°회전하여) 삽입되면, X_{1.0}은 -4 mm이고, X_{14.0}은 0 mm이다. 즉, 본 발명에 제공된 것처럼, 휘어짐은 이제 바깥쪽을 가리키게 된다. 결과(도 9 및 도 10)는 도 7 및 도 8의 경우처럼 "모두 한 방향"으로 설정되지 않고, 새로운 노심(도 5 및 도 6)에서처럼 다시 방사상 대칭으로 나타난다. 즉, 이러한 방사상 대칭은 X_{1.0}이 0 mm이고 X_{14.0}이 4 mm인 미러 이미지(mirror image) 상태에서도 발생하며, 상기 미러 이미지 상태에서는 연료 엘리먼트(Q₁₄)가 반대 방향(즉, 노심 내부에서 바깥쪽)으로 휘어진다.

따라서 도 9 및 도 10에 도시된 조건은 X_{1.0} = -4 mm, X_{14.0} = 4 mm인 경우 또는 일반적으로 노심 가장자리에서 나타나는 모든 휘어짐이, 본 발명에 의해 제공되는 것처럼, 항상 바깥쪽을 향하는 경우에 비로소 적절하게 적용된다.

도 9 및 도 10도 역시 실제로 가능한데, 그 이유는 휘어짐에 특히 내성(resistant)이 있는 이러한 유형의 평형이 실제로 적어도 하나의 노심에서 이미 관찰되었기 때문이다. 사이클 종료시의 휘어짐과 갭 폭에 관한 기록 자료 및 상기 원자로의 과거 이력에 나타나 있는 기록된 데이터는, 이러한 경우에 도 9 및 도 10에 도시된 특성을 야기하는, 이레디에이트되고, 바깥쪽으로 휘어진 부분을 갖는 연료 엘리먼트가 노심 가장자리에 있는 적어도 다수의 연료 엘리먼트 위치들에 삽입되는 경우와 일치한다.

측정 결과들을 비교해보면, 연료 엘리먼트의 몇몇 가장자리에 있어서 초기 휘어짐의 방향이 단지 180°회전된 초기 방향으로 바뀌는 경우, "방사상 외부 방향으로"의 휘어짐으로부터 "모두 한 방향으로"의 휘어짐으로 질적 전이(qualitative transition)가 발생한다는 것이 이러한 모델 계산으로부터 확인될 수 있다.

도 9에 따르면 최대 휘어짐이 도 7에 비해 감소되었고, 처음에 이미 나타났던 소성 휘어짐(가장자리 연료 엘리먼트(Q₁)의 경우 X_{1.0} = 4 mm)에 비해서는 더욱 크게 감소되었다. 도 8과 비교해보면, 최대 갭 폭(G_{max}(도 10))도 역시 약 4.2 mm(노심 가장자리)에서 약 2.5 mm(노심 중심)로 감소되었다.

여기서 고려되고 있는 효과를 위해서는 삽입된 연료 엘리먼트의 골격(skeleton)들과 냉각수 플로우 사이에 상호 작용(이 경우 매개변수 α 를 통해 모델 계산에 도입됨)이 존재하는 것이 매우 중요하다. X_{1.0} = 4 mm이고 X_{14.0} = 0(도 7 및 도 8에 도시되어 있는 상태)일 때 상기 매개변수가 0으로 설정되면, 많은 노심들에서 관찰된 특성은 도 7 및 도 8에 도시된 것과 유사한 반면에, 모델 계산의 결과 도 11 및 도 12에 도시된 것처럼 전혀 관찰되지 않았던 특성이 나타난다.

본 발명에 따라 노심을 조립하기 위해서는 이레디에이트된 노심의 가장자리 연료 엘리먼트의 휘어짐 정도를 알아야 한다. 리로딩(reloading) 계획에 따른 재활용에 적합한 것으로 보이는 잔류 활성을 가진 연료 엘리먼트가 검사(inspection) 스테이션에서 결함 여부에 대해 검사되는 경우, 공지된 문헌들(예를 들어, EP 0727787, FR 2721704, FR 2304149, FR 2754892, JP 02259401, JP 62238406, US 4605531 등)에서 이미 설명되어 있는 것처럼, 대응하는 측정들이 수행될 수 있다. 또한, 연료 엘리먼트가 구(舊) 원자로 노심으로부터 옮겨져서 그리고/또는 그 후에 새로운 노심에 대하여 제공되는 위치로 이동되는 시점에서, 상기 연료 엘리먼트가 광 센서 또는 초음파 센서를 지나도록 이동될 수 있으며, 상기 광 센서 또는 초음파 센서는 연료 엘리먼트의 외부 범위(예: 연료 엘리먼트 스페이스의 위치)를 수직 세로 방향으로 스캐닝한다.

종합적으로 도 13에 예시로 개략 도시되어 있는 방법이 제공된다. 원자로의 가동이 멈추고 마지막 작업 사이클이 종료되면, 단계 "St1"에서 원자로 압력 탱크 내에 배치되어 있는 구 원자로 노심(RC')으로부터 연료 엘리먼트들이 연료 엘리먼트 로딩 장치(교환기)에 의해 들어올려지고, 단계 "St2"에서는 연료 엘리먼트들이 조립될 새로운 노심의 가장자리에서 재사용되어야 하는 경우에, 연료 엘리먼트의 휘어짐 정도가 측정된다. 단계 "St3"에서는 연료 엘리먼트가 로딩 계획에 따라 제공되는 위치로 이동되고, 거기서 본 발명에서 제공된 방향에 따라 필요한 경우에는 상기 연료 엘리먼트의 세로축을 중심으로 회전된다. 이어서 상기 연료 엘리먼트는 다시 원자로 압력 탱크 내로, 즉 로딩 계획에 의해 주어지는 조립될 새로운 노심의 연료 엘리먼트 위치들로 옮겨진다(단계 "St4"). 새로운 노심의 다른 위치에는, 몇몇 경우들에서는 마찬가지로 구 노심으로부터 제거된 연료 엘리먼트가 삽입되고, 몇몇 경우들에서는 단계 "St5"에 의해 표시된 것처럼, 새로 제조된 연료 엘리먼트가 삽입된다.

이미 설명한 바와 같이, 사이클 내에서 발생하는 평형 상태는 노심 내부의 대응하는 시작 조건이 아니라 가장자리에 있는 연료 엘리먼트의 변형과 관련된 시작 조건에 따라 좌우된다. 내부 연료 엘리먼트가 적어도 사이클 시작시 제어봉이 여전히 장애 없이 하강하여 인접 연료 엘리먼트들 사이에 문제없이 삽입될 수 있다면, 내부 연료 엘리먼트들을 결합이 있는 것으로 간주하거나 교체할 필요가 없다. 하지만, 본 발명의 사용시 (냉각수와의 상호 작용이 입증됨으로써) 상기 내부 연료 엘리먼트가 허용 가능한 정도로 다시 휘어질 것임을 예상할 수 있다. 따라서 상기 연료 엘리먼트의 휘어짐에 신경쓸 필요가 없다.

모델 고찰(model consideration)을 통해서도, 모든 가장자리 연료 엘리먼트가 명백히 바깥쪽을 향하도록 휘어져야 하는 것은 아니라는 사실이 유추된다. 가끔 시설 보호의 이유에서 제공되는 것처럼 몇몇 휘어지지 않는 더미(dummy) 연료 엘리먼트들 또는 (예컨대, 다른 이유들로 인한 수리의 결과로서) 크게 휘어지지 않은 활성이 낮은 연료 엘리먼트들이 가장자리에 삽입되는 것은 문제가 되지 않는다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

원자로 노심(reactor core)을 조립하기 위한 방법으로서,

이레디에이트된(irradiated) 연료 엘리먼트들을 가압경수로의 원자로 노심으로 제공하는 단계;

주어진 로딩 계획(loading plan)에 따라 상기 이레디에이트된 연료 엘리먼트들을 재사용하는 단계;

상기 원자로 노심의 가장자리(edge)에 상기 이레디에이트된 연료 엘리먼트들 중에서 휘어진 연료 엘리먼트들을 삽입하는 단계; 및

상기 연료 엘리먼트들의 각각의 최대로 휘어진 부분(maximum extent of a bending)이 상기 원자로 노심의 외부면(outer side)을 향하도록 상기 원자로 노심의 가장자리에 삽입된 상기 이레디에이트된 연료 엘리먼트들 중에서 휘어진 연료 엘리먼트들을 배향시키는(orienting) 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자로 노심 조립 방법.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 로딩 계획에 따라, 상기 원자로 노심의 가장자리에 있는 위치들에 상기 원자로 노심의 평균 반응성보다 낮은 반응성을 가지는 연료 엘리먼트들을 제공하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자로 노심 조립 방법.

청구항 3.

제 1 항에 있어서,

상기 원자로 노심의 가장자리에 있는 연료 엘리먼트 위치들에 근접한 연료 엘리먼트 위치들에서 휘어진 연료 엘리먼트들을 사용하는 단계와 상기 휘어진 연료 엘리먼트들의 각각의 휘어진 부분이 상기 원자로 노심의 가장자리를 향하도록 상기 휘어진 연료 엘리먼트들을 배향시키는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자로 노심 조립 방법.

청구항 4.

새롭게 리로딩된(reloaded) 가압경수로에 대한 원자로 노심 구성에 있어서,

상기 원자로 노심은 연료 엘리먼트들을 포함하고, 외부면과 가장자리를 가지고, 상기 가장자리에 있는 연료 엘리먼트 위치들을 가지며,

상기 연료 엘리먼트들 중에서 이레디에이트되고 휘어진 연료 엘리먼트들은 상기 원자로 노심의 상기 가장자리에 있는 상기 연료 엘리먼트 위치들에 배치되는데, 상기 원자로 노심의 상기 가장자리에 배치된 상기 이레디에이트되고 휘어진 연료 엘리먼트들은 각각 최대로 휘어진 부분을 가지며, 상기 원자로 노심의 상기 가장자리에 배치된 상기 이레디에이트되고 휘어진 연료 엘리먼트들은 상기 각각의 최대로 휘어진 부분이 상기 원자로 노심의 상기 외부면에 있도록 배향되는 것을 특징으로 하는 원자로 노심.

청구항 5.

제 4 항에 있어서,

상기 원자로 노심은 상기 가장자리에 있는 상기 연료 엘리먼트 위치들에 근접한 연료 엘리먼트 위치들을 가지며,

상기 가장자리에 있는 상기 연료 엘리먼트 위치들 및 상기 가장자리에 있는 상기 연료 엘리먼트 위치들에 근접한 상기 연료 엘리먼트 위치들 각각은 실질적으로 휘어짐이 없거나 또는 상기 원자로 노심으로부터 바깥쪽을 향하는 휘어짐을 가지는 연료 엘리먼트로 구성된 그룹으로부터 선택된 연료 엘리먼트로 지정되는 것을 특징으로 하는 원자로 노심.

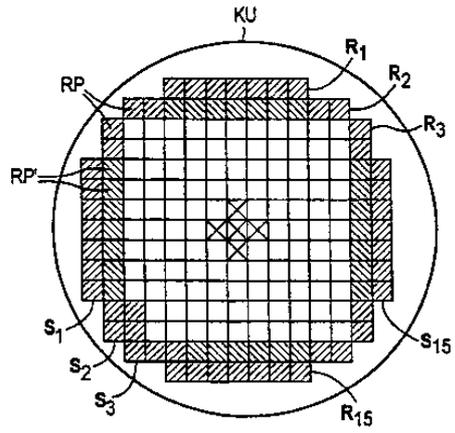
청구항 6.

제 4 항에 있어서,

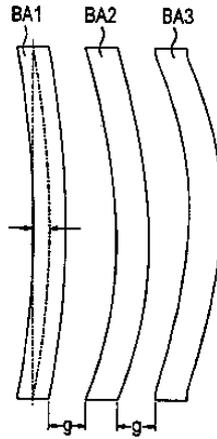
상기 원자로 노심의 상기 가장자리에 배치된 상기 연료 엘리먼트들 각각은 상기 원자로 노심의 상기 연료 엘리먼트들 모두의 핵분열성(fissile) 질량의 평균값보다 작은 핵분열성 질량을 가지는 것을 특징으로 하는 원자로 노심.

도면

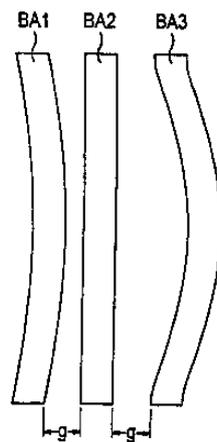
도면1



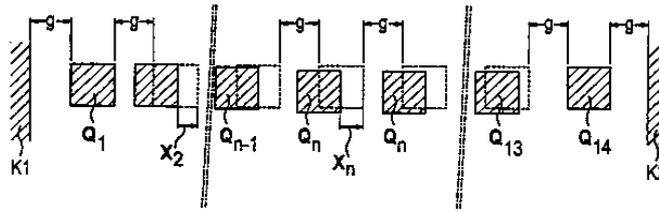
도면2



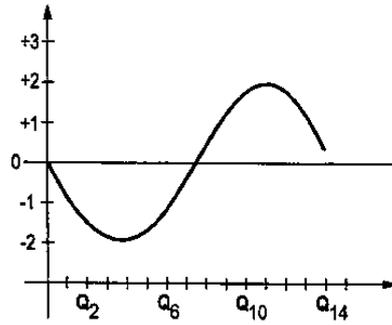
도면3



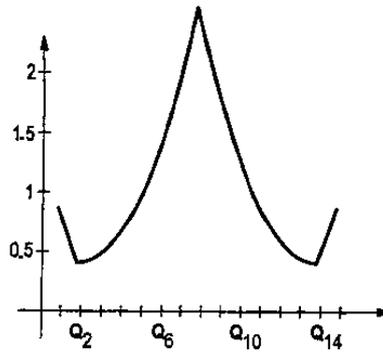
도면4



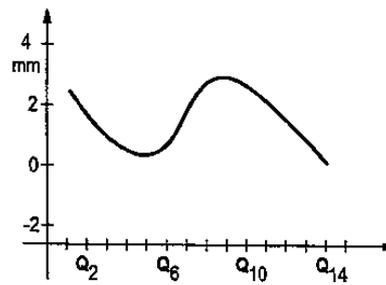
도면5



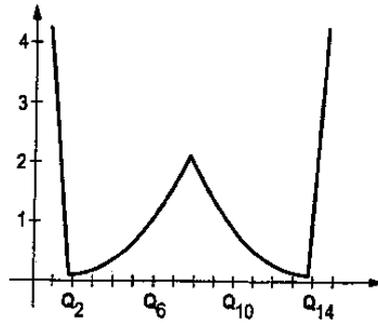
도면6



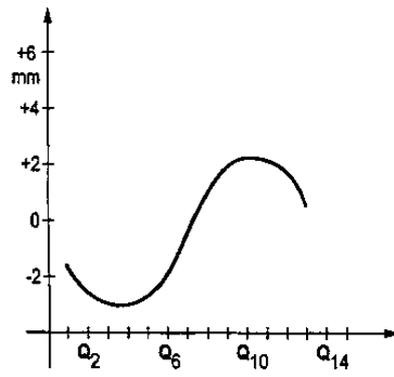
도면7



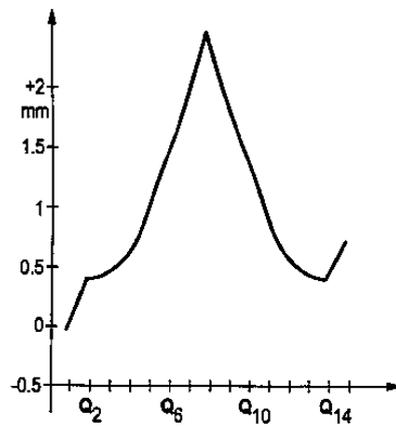
도면8



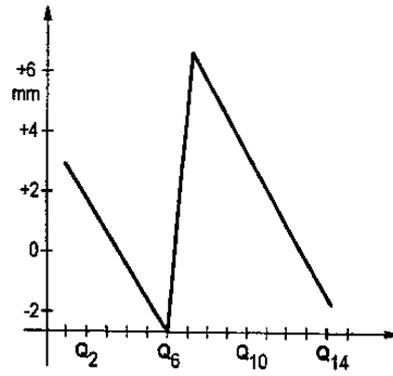
도면9



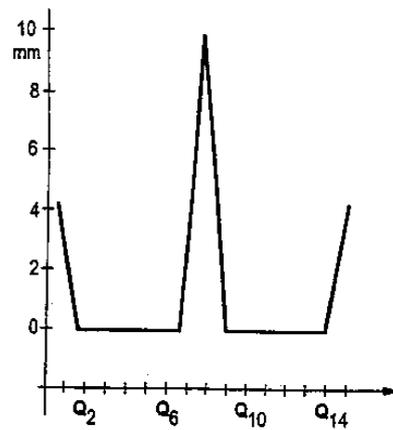
도면10



도면11



도면12



도면13

